

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

РОМАНЮК Антон Валерійович



УДК 621.396.1

**МЕТОДИ ЗБОРУ ДАНИХ З БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ**

Спеціальність 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України **Лисенко Олександр Іванович**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри телекомунікацій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Войтер Анатолій Петрович**, Інститут ядерних досліджень НАН України, заступник директора з науково-технічної роботи;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Степанов Михайло Миколайович**, Київський національний університет імені Тараса Шевченко, професор кафедри інформаційних систем та технологій.

Захист дисертації відбудеться 27 квітня 2021 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.14 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 03056, Київ-56, пр. Перемоги, 37, корпус № 1, ауд. 255.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ-56, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий березня 2021 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



Л.О. Уривський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останні роки в усьому світі все більше застосування знаходять безпроводові сенсорні мережі (БСМ) – розподілені, самоорганізуючі мережі, що складаються з множини вузлів (датчиків, сенсорів), об'єднаних між собою радіоканалами, та здійснюють моніторинг параметрів зовнішнього середовища або об'єктів спостереження.

В конструктивному плані основною відмінністю БСМ від радіомереж класу MANET є використання в якості вузлів значної кількості надмініатюрних та дешевих пристроїв. Кількість вузлів визначається тільки областю застосування та завдяки малій вартості може бути значною (сотні, тисячі та більше). В експлуатаційному плані основними відмінностями є, по-перше, специфічні системні вимоги (робота при різних зовнішніх впливах, змінна топологія із-за відмов, переміщення вузлів тощо) та, по-друге, жорсткі вимоги до ресурсів (енергії, продуктивності процесора, пам'яті, радіоканалу тощо).

Для певного класу БСМ (великої розмірності, важкодоступних, розміщених на території без телекомунікаційної інфраструктури загального користування, незв'язних) виникають значні труднощі або неможливість організації збору даних моніторингу. Застосування в архітектурі мереж даного класу телекомунікаційних аероплатформ (ТА) дозволяє організувати та скоротити час на збір даних, зв'язати незв'язні фрагменти мереж, збільшити тривалість функціонування мережі тощо. Однак для реалізації процесу збору даних моніторингу в системі управління даної неоднорідної мережі необхідно реалізувати відповідні методи і алгоритми управління.

Запропоновані на сьогодні методи та алгоритми збору даних ТА вирішують лише часткові завдання збору даних, не враховують особливості функціонування даного класу мереж (відсутність телекомунікаційної інфраструктури загального користування, наявність не зв'язних підмереж, важкодоступність) та наявні ресурси мережі, багатокритеріальний характер цільових функцій управління мережею, призводять до значної витрати енергії вузлів і відповідно малого часу функціонування мережі та потребують вдосконалення.

Отже виникає **актуальна наукова задача** – вдосконалення методів збору даних моніторингу з БСМ телекомунікаційними аероплатформами в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування, важкодоступних та/або незв'язних безпроводових сенсорних мереж, які дозволяли би враховувати наявні ресурси мереж та здійснювати багатоцільове управління.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі телекомунікацій інституту телекомунікаційних систем відповідно до плану науково-дослідної роботи НТУУ „КПІ ім. Ігоря Сікорського” в рамках науково-дослідних робіт № 0111U04806 “Розробка принципів побудови безпроводових сенсорних мереж із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища” та № 0117U004282 “Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами, телекомунікаційними наземними вузлами та

аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації”, що присвячені підвищенню ефективності функціонування БСМ з використанням ТА.

Мета роботи та завдання дослідження. *Метою роботи є підвищення ефективності процесу збору даних з БСМ телекомунікаційними аероплатформами.*

Відповідно до поставленої мети, в дисертаційній роботі ставилися та вирішувалися такі взаємозалежні завдання дослідження:

1. Аналіз задач управління БСМ з використанням ТА, методів та алгоритмів збору даних з БСМ телекомунікаційними аероплатформами.

2. Аналіз математичних моделей: кластеризації БСМ, оцінки енерговитрат вузлів, часу збору даних, передачі даних моніторингу, позиціонування ТА.

4. Вдосконалити алгоритми пошуку положення та переміщення телекомунікаційних аероплатформ для досягнення заданих цілей управління при зборі даних моніторингу.

5. Вдосконалити методи збору даних з БСМ телекомунікаційними аероплатформами.

6. Оцінити ефективність запропонованих методів збору даних з вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами.

Об’єкт досліджень – процес функціонування БСМ із застосуванням телекомунікаційних аероплатформ для збору даних моніторингу.

Предмет досліджень – методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування.

Методи дослідження. При вирішенні сформульованої наукової задачі в дисертаційній роботі були використані методи кластерного аналізу (при кластеризації мережі), теорії графів (при дослідженні аналітичних моделей показників функціонування БСМ із ТА, побудові топології кластерів), теорії телекомунікаційних мереж (при розрахунку пропускної здатності в радіоканалах БСМ із ТА) та теорії оптимізації (при розробці моделі позиціонування положення телекомунікаційних аероплатформ).

Достовірність одержаних результатів і обґрунтованість наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації, забезпечується математичною строгістю та коректністю використання апробованого математичного апарату, системного аналізу, теорії телекомунікаційних мереж, а також підтверджується збігом результатів теоретичних досліджень та імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. До нових наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі, відносяться.

1. Вдосконалений метод безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів безпроводової сенсорної мережі з їх кластеризацією телекомунікаційними аероплатформами.

Відмінність вдосконаленого методу, що визначає його новизну є:

на етапі кластеризації мережі – застосування двох алгоритмів кластерного аналізу FOREL та k -середніх для здійснення віртуальної кластеризації мережі, які, на відміну від відомих, адаптують розмір зони обслуговування телекомунікаційної аероплатформи для забезпечення цільових функцій управління мережею.

на етапі обльоту кластера мережі ТА запропоновані правила вибору точок обміну для зменшення витрат енергії вузлів.

2. Вдосконалена траєкторно-позиційна модель передачі даних між телекомунікаційною аероплатформою і вузлами кластера.

Суть вдосконалення моделі, що визначає її новизну є врахування траєкторії та швидкості польоту (точки позиціонування) телекомунікаційної аероплатформи, взаємного розташування наземних вузлів зони її обслуговування при плануванні їх передач для забезпечення заданої якості обміну даними моніторингу.

3. Вдосконалений метод збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами з головних вузлів кластеризованої БСМ.

Сутність вдосконалення, що визначає його новизну є: запропонована нова множина метрик вибору головних вузлів кластерів для досягнення певних цільових функцій управління збором даних моніторингу, використання вдосконалених правил знаходження енергоефективних структур кластерів методом спрямованого перебору варіантів та енергозалежних метрик вибору маршрутів при застосуванні зондового координатного методу маршрутизації в кластері.

Практична значимість отриманих результатів. Практичне значення отриманих в дисертаційній роботі наукових результатів полягає в тому, що розроблені методи, математичні моделі та алгоритми дозволяють:

визначати траєкторію (положення) телекомунікаційних аероплатформ для збору даних моніторингу БСМ для досягнення різних цільових функцій управління мережею в режимі реального часу;

планувати траєкторії переміщення ТА для обміну даними між ТА і вузлами мережі;

підвищити ефективність алгоритмічного та математичного забезпечення системи управління БСМ, яка реалізує функції збору даних з її вузлів ТА.

Отримані в дисертації результати можуть бути використані:

1) організаціями-замовниками та науково-дослідними організаціями Міністерства оборони та Державної служби України з надзвичайних ситуацій при розробці тактико-технічних вимог до перспективних БСМ, які використовують ТА для збору даних моніторингу;

2) вищими навчальними закладами України, що займаються підготовкою спеціалістів з телекомунікаційних систем.

Результати досліджень дисертаційної роботи використані у діяльності державних установ: Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України, Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, Асоціація фахівців цивільного захисту; також впроваджені у навчальний процес кафедри телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем „КПІ ім. Ігоря Сікорського”, а також реалізовані в науково-дослідних роботах НТУУ „КПІ ім. Ігоря Сікорського”: „Методи підвищення ефективності телекомунікаційних систем: безпроводові епізодичні мережі із використанням БПЛА”, „Методи та системи управління безпроводовими сенсорними мережами із мобільними сенсорами, телекомунікаційними наземними вузлами та аероплатформами у зоні надзвичайної ситуації”.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Окрім одноосібних статей [2 – 6], у спільних наукових працях здобувачеві належить наступне: в [1] – ієрархічна модель системи управління радіомереж типу MANET; [7] – метод підвищення пропускної здатності мобільних ad-hoc мереж на основі управління місцем розташування безпілотних літальних апаратів у зоні надзвичайної ситуації; [8] – розроблено модель підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ; [9] – здійснено аналіз та класифікацію існуючих методів подання та отримання знань та визначено можливість їх використання при побудові інтелектуальних систем управління вузлами радіомереж класу MANET; [10] – запропоновано удосконалену функціональну модель системи управління безпроводової сенсорної мережі із самоорганізацією для оперативного моніторингу стану природного середовища; [11] – проведено аналіз методів управління топологією БСМ; [12] – проведено аналіз моделей побудови покриття і моделей виявлення цілей, які використовуються в безпроводових сенсорних мережах; в [13] – запропоновані показники оцінки ефективності радіомереж з ТА; в [14] – проведено аналіз методів маршрутизації, які використовуються в безпроводових сенсорних мережах, визначено недоліки та переваги зазначених методів та надано рекомендації щодо синтезу нових і вдосконалення існуючих методів; [15] – запропонована нова архітектура системи управління безпроводовими сенсорними мережами з неоднорідними сенсорами; [16] – запропоновані основні напрями підвищення ефективності процесу збору даних з БСМ; [17] – сформульовані напрями синтезу методів збору даних з БСМ з використанням ТА; [41] – розглянуто основні теоретичні підходи до передачі інформації моніторингу БСМ в умовах радіоперешкод; [42] – сформульована задача досягнення пропускної здатності в кластеризованих сенсорних мережах.

Апробація результатів дослідження. Основні ідеї та результати досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних конференціях (КриМіКо) „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (м. Севастополь, 2012, 2013 pp.) [18, 19], міжнародних науково-технічних конференціях „Проблеми телекомунікацій” (НТУУ „КПІ”, м. Київ, 2015...2020 pp.) [20 – 25]; III міжнародній конференції „*Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments*» (IEEE APUAVD) (НАУ, Київ, 2015 p.) [26]; міжнародній науковій конференції „*Science & Military*” (Академія Збройних Сил Генерала Мілана Растіслава Штефаніка, Липтовський Мікулаш, Словаччина, 2016 p.) [27, 28]; міжнародній науково-практичній конференції „Відкриті еволюційні системи” (НАТІ, Ніжин, 2017 p.) [29]; міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (УкрМіКо), м. Київ, 2016 p. [30]; міжнародній конференції „The International Emergency Management Society Newsletter”, 2016 p. (Ukraine) [31]; науково-практичних семінарах та конференціях „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення” (ВІТІ, м. Київ, 2012...2018 pp.) [32 – 37], міжнародній конференції „14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. TCSET-2018”, Lviv, 2018 p. [38],

міжнародній конференції „4th International Conference METHODS AND SYSTEMS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL (MSNMC-2016)”, Kyiv, 2016 p. [39].

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 42 роботах, з них: 17 статей у наукових фахових виданнях, в тому числі 1 стаття у періодичних наукових фахових виданнях держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу, 16 статей у фахових виданнях, наведених у переліку МОН України, 5 одноосібних статей; 22 тези доповідей, з них 6 тез містяться в наукометричній базі SCOPUS; 3 статті додатково відображають результати дисертації.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг становить 158 сторінок, 52 рисунка, 10 таблиць, 2 додатки на 14 сторінках та список використаних джерел, що містить 97 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В анотації у скороченому вигляді наведено основні результати, отримані в роботі, показана їх наукова новизна і практичне значення, а також наведено ключові слова і список публікацій за темою роботи.

У вступі на основі аналізу сучасного стану безпроводових сенсорних мереж висвітлено актуальність теми роботи, її зв'язок з науковими програмами, планами, темами, що розроблюються на кафедрі, сформульовано мету та основні завдання роботи, показано методи наукових досліджень, обґрунтовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відзначено особистий внесок здобувача, наведено дані про апробацію представлених результатів, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі „Аналіз архітектур безпроводових сенсорних мереж із використанням телекомунікаційних аероплатформ та методів збору даних моніторингу” проведено класифікацію БСМ, визначені характеристики сенсорних вузлів та телекомунікаційних аероплатформ, проведена класифікація завдань управління наземно-повітряними мережами, проведений аналіз існуючих архітектур щодо управління процесом збору даних моніторингу, визначена задача дослідження та шляхи її вирішення.

Характерними особливостями БСМ є: значна розмірність (сотні, тисячі вузлів), обмеженість ресурсів вузлів (енергії батареї, продуктивності процесора, пам'яті, потужності передавача, пропускну здатності радіоканалу) тощо. Збір інформації моніторингу з вузлів БСМ класичними методами призводить до значних витрат енергії вузлів та малого часу функціонування мережі.

Застосування ТА для збору даних моніторингу має явні переваги над іншими способами: малий час збору, не потребує спеціальних маршрутів переміщення (в порівнянні з мобільними наземними роботами), більша зона покриття, наявність прямої видимості в каналах радіозв'язку, надає можливість забезпечити збір даних в умовах відсутності будь-якої телекомунікаційної інфраструктури загального користування та наявності незв'язних підмереж.

Ефективне функціонування таких складних мереж не можливе без відповідної системи управління, складовою частиною якої є підсистема управління збором даних з вузлів БСМ з використанням ТА, яка реалізована в вигляді спеціального програмного забезпечення на вузлах мережі, ТА і наземному центрі управління.

Завданням збору даних з безпроводових сенсорних мереж присвячена значна кількість робіт зарубіжних (R. Zhang, H. Okcu, D.-T. Ho, E.I. Grotli, M. Soyuturk, Кучерявий А.Е., Киричек Р.В. тощо) та вітчизняних (Лисенко О.І., Валуйський С.В. тощо) вчених. За результатами аналізу встановлено, що більшість запропонованих на сьогодні методів збору даних вирішують лише часткові завдання збору даних, не враховують особливості функціонування конкретних мереж, багатокритеріальний характер цільових функцій управління мережею та потребують вдосконалення. Існуючі методи збору даних з наземних безпроводових сенсорних мереж не прийнятні в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури, наявності незв'язних підмереж, призводять до значної витрати енергії батарей вузлів та відповідно малого часу функціонування мережі, не дозволяють відпрацьовувати отримані рішення в режимі реального часу. Отже виникає актуальна наукова задача вдосконалення методів збору даних моніторингу з БСМ за допомогою ТА в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування, важкодоступних та/або незв'язних безпроводових сенсорних мереж, які дозволяли би враховувати наявні ресурси мереж та здійснювати багатоцільове управління мережею.

В роботі запропонована послідовність та основні етапи синтезу методів збору даних з використанням ТА: аналіз вихідних даних, визначення способу управління і цільових функцій управління; визначення класу методів збору даних (безпосереднього збору ТА з кожного вузла або збір даних ТА з головних вузлів кластерів), розробка основних етапів їх функціонування, алгоритмів (моделей) обміну між вузлами і ТА; розробка моделей побудови траєкторії польоту ТА; визначення моделей польоту (рис. 1).



Рисунок 1 – Складові синтезу методів збору даних з вузлів ТА

Визначені основні етапи функціонування БСМ за збором даних (рис. 2):

1. Збір центром управління (ЦУ) даних про стан мережі.

2. Розрахунок ЦУ точок збору даних.
3. Побудова ЦУ маршруту обльоту точок збору даних.
4. Політ ТА, обмін даними моніторингу між визначеними вузлами з ТА.
5. Приліт в задану точку та передача інформації з ТА в центр збору даних моніторингу.

У **другому розділі** „Вдосконалений метод безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів безпроводової сенсорної мережі з їх кластеризацією телекомунікаційними аероплатформами” запропоновані основні етапи синтезу методу безпосереднього збору даних (МБЗД) в вузлів БСМ з їх кластеризацією ТА: визначення алгоритмів кластеризації мережі, побудова точок збору даних моніторингу, побудова маршрутів обльоту точок збору, організація процесу обміну між вузлами і ТА.

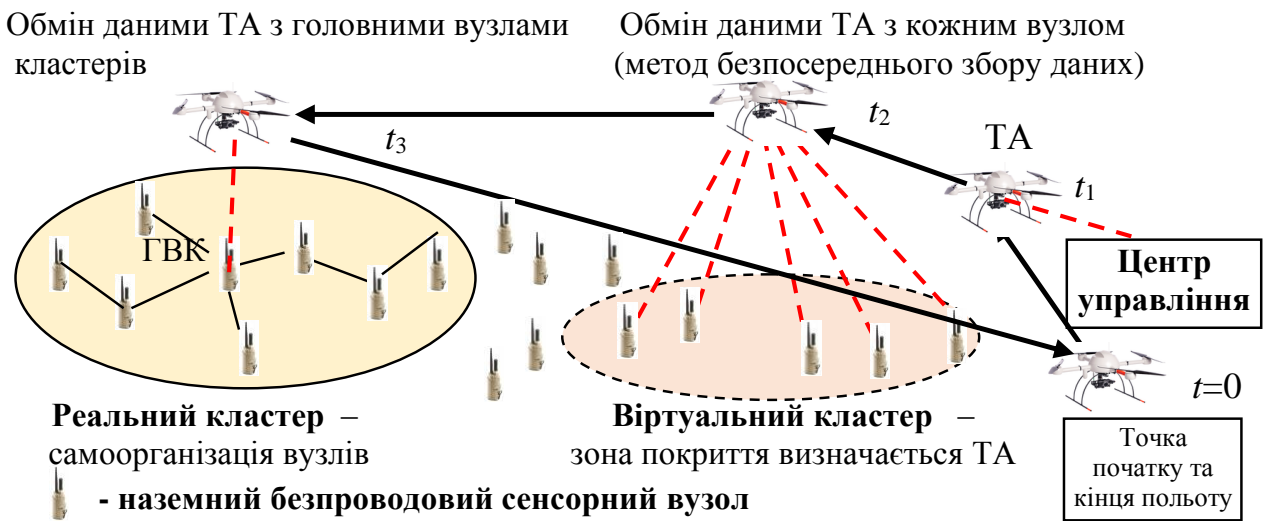


Рисунок 2 – Ілюстрація методів збору даних з вузлів ТА

Сформульовано загальну постановку задачі.

Дано: характеристики вузлів БСМ та телекомунікаційних аероплатформ: N – кількість стаціонарних сенсорних вузлів мережі та координати їх розміщення на місцевості; $N_{ТА}$ – кількість ТА; $V_{дмі}$ – об’єм даних моніторингу i -го вузла, $i=1 \dots N$; технічні та телекомунікаційні характеристики наземних сенсорних вузлів, ТА; кожен вузол мережі має власну систему управління, діє в кооперації з ТА (з іншими вузлами).

Необхідно: визначити кількість та координати точок збору даних, порядок збору даних моніторингу з вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами та траєкторію їх переміщення (позиціонування), для виконання певних цільових функцій (ЦФ) управління: мінімізація або забезпечення часу збору ($T_{зб}$) даних (1), максимізація або забезпечення певного часу функціонування (T_{ϕ}) БСМ (2), мінімізація або використання заданої кількості ($N_{ТА}$) ТА (3)

$$T_{зб} \rightarrow \min \text{ або } T_{зб} \leq T_{зб\text{зад}}, \quad (1)$$

$$T_{\phi} \rightarrow \min \text{ або } T_{\phi} \geq T_{\phi\text{зад}}, \quad (2)$$

$$N_{ТА} \rightarrow \min \text{ або } N_{ТА} \leq N_{ТА\text{зад}}, \quad (3)$$

$$T_{зб} = L_{мб}/v; L_{мр} = f(n_{кл}, (x, y)_k, h, t_{обк}, St), k = 1 \dots n_k, \quad (5)$$

при обмеженнях Ω на: (6)

граничний час (довжину маршруту L) в раунді польоту ТА –

$$T_{зб} \leq T_{пол\max} \quad (0 < L_{мб} \leq L_{мр} \leq L_{м\max});$$

швидкість польоту ТА – $v = [v_{\min}, v_{\max}]$; кількість кластерів – $1 \leq k \leq n_k$;

енергію батарей вузлів і ТА – $e_i \leq e_{\max}$, $e_{ТА} \leq e_{ТА\max}$;

координати розташування (x, y) вузлів, які знаходяться в зоні моніторингу;

висоту польоту ТА – $h = [h_{\min}, h_{\max}]$; дальність радіозв'язку $d \leq d_{\max}$;

розмір буферів вузлів і ТА – $V_{буфвузл} \leq V_{буфвуз\max}$; $V_{буфТА} \leq V_{буфТА\max}$;

вимоги моделей обслуговування (гарантована якість обслуговування – час обльоту кожного k -го кластера $t_{обклk}$ повинен бути більшим ніж сумарний час передачі між всіма вузлами і ТА – $t_{обклk} \geq t_{перk}$);

St – множину стратегій (правил) обльоту кластера.

Час збору даних (вираз 5) залежить від довжини маршруту польоту, який визначається кількістю та розміщенням точок збору даних, швидкістю переміщення ТА при задоволенні часу передачі вузлів при обраній стратегії обльоту кластерів. На рис. 3 наведений варіант обльоту ТА 5-ти кластерів при зборі даних моніторингу з визначених точок збору.

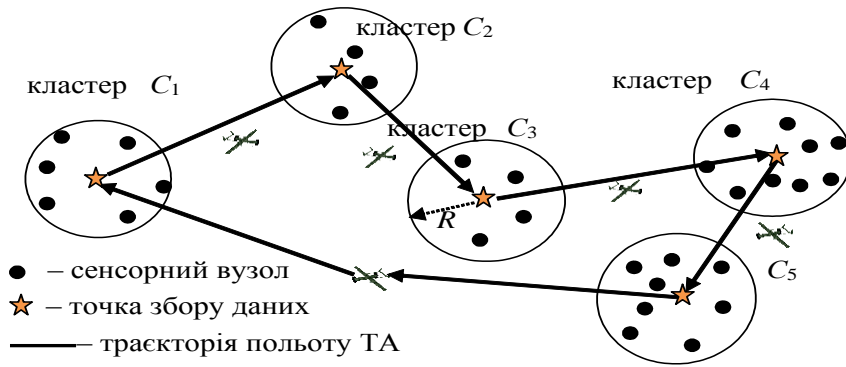


Рисунок 3 – Варіант переміщення ТА між точками збору даних

Для мінімізації кількості точок збору необхідно мінімізувати кількість кластерів

$$\text{Min } K, \quad (7)$$

при виконанні обмежень

$$\min_{y_1, y_2, \dots, y_K} \max_j \min_{x \in C_j} |x - y_k| \leq d_{\max}, \quad k = \overline{1, K}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (8)$$

$$q_j \leq q_{j\max}, \quad (9)$$

$$K \leq K_{\max}, \quad R = [R_{\min} \dots R_{\max}], \quad h = [h_{\min} \dots h_{\max}], \quad (10)$$

де $|x - y|$ – Евклідова відстань між крапками x та y на місцевості, q_j – кількість сенсорних вузлів в j -му кластері. Нерівність (8) – максимальна відстань між центром зони покриття та сенсорними вузлами повинна бути мінімізована; нерівність (9) визначає граничну кількість вузлів в кластерах; (10) – задає ресурсні обмеження.

Задача відноситься до класу NP -повних, одержання точного рішення для мереж великої розмірності є складним, тому для її рішення необхідно використовувати евристичні методи. Для тимчасової кластеризації мережі в якості головного вузла кластера запропоновано використовувати ТА, яка реалізує (на відміну існуючих центроїдних алгоритмів) модифіковані ітераційні алгоритми кластерного аналізу

FOREL (FORmal ELeмент) та k -середніх, які знаходять мінімальну (або задану) кількість точок збору даних в мережі.

Базовий маршрут обльоту точок збору даних (його довжина $L_{\text{мб}}$) будується за одним з відомих методів побудови найкоротшого шляху (рішення задачі комівояжера), наприклад, методом пошуку найближчого сусіда, який має незначну обчислювальну складність та близькі до оптимальних рішення.

Для обльоту вузлів кластерів запропоновані правила корегування базового маршруту обльоту, які враховують пріоритет певних цільових функцій управління мережею (вирази 1 – 3).

Запропоновані аналітичні моделі оцінки часу збору даних ТА з вузлів мережі, які дозволяють здійснювати планування траєкторії переміщення та оцінювати ефективність прийнятих рішень.

Сумарний час прольоту (збору даних) всіх вузлів $j = 1 \dots J$ (або точок збору даних) в кластері повинен бути мінімальним. Тоді

$$T_{\text{зб}} = \sum_{j=1}^{J-1} t_{\text{пр}j,j+1} / v_{j,j+1} \rightarrow \min \quad (11)$$

де $t_{\text{пр}}$ – час прольоту ТА всіх вузлів кластера, v – швидкість польоту.

$$\begin{aligned} t_{\text{пр}j} &\geq t_{\text{пер}j} = s(d, \Pi_{\text{кф}}) / (V_{\text{дм}j}), \\ t_{\text{пер}j} &= t_{\text{всзв}j} + t_{\text{оч}j} + t_{\text{бпер}j}. \end{aligned} \quad (12)$$

Час передачі $t_{\text{пер}j}$ складається з інтервалів: встановлення зв'язку $t_{\text{всзв}j}$ (обмін службовими повідомленнями), очікування передачі $t_{\text{оч}j}$ (згідно протоколу множинного доступу до каналу) та передача даних моніторингу $t_{\text{бпер}j}$ (швидкість передачі s в радіоканалі залежить від відстані d між вузлом і ТА, протоколів ($\Pi_{\text{кф}}$) каналного та фізичного рівнів). Час обміну даними не повинен перевищувати час існування радіоканалу при польоті ТА над цим вузлом (12). Тому висота польоту ТА визначається з врахуванням цільових функцій управління мережею та обмежень на її ресурси.

Запропонований узагальнений алгоритм реалізації методу безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів БСМ телекомунікаційними аероплатформами, який наведений на рис. 4.

Він дозволяє скоротити маршрут обльоту та, відповідно, час збору даних за рахунок мінімізації кількості кластерів (точок збору даних моніторингу); збільшити час функціонування мережі за рахунок зменшення потужностей передач між ТА і сенсорними вузлами, адаптації радіусу покриття ТА, знаходження найближчих точок обміну до маршруту переміщення ТА, побудови енергоефективних маршрутів передачі даних між вузлами кластера і ТА.

Для оцінки результатів функціонування алгоритму здійснена його програмна реалізація в середовищі MATLAB. Проведено експерименти і отримані залежності: часу збору даних, часу стабільного функціонування мережі від розмірності мережі, кількості вузлів в кластері при застосуванні різних алгоритмів збору даних.

Проведена оцінка ефективності застосування вдосконаленого методу безпосереднього збору даних з БСМ ТА. Він дозволяє отримати вигоду у часі збору даних моніторингу мережі на 10 – 15% (за рахунок зменшення точок збору даних), та збільшити час функціонування мережі (за рахунок нових правил обльоту вузлів в

кластерах) на 12 – 17% у порівнянні з існуючими центроїдними методами безпосереднього збору даних, має незначну обчислювальну складність $O(n^2)$.

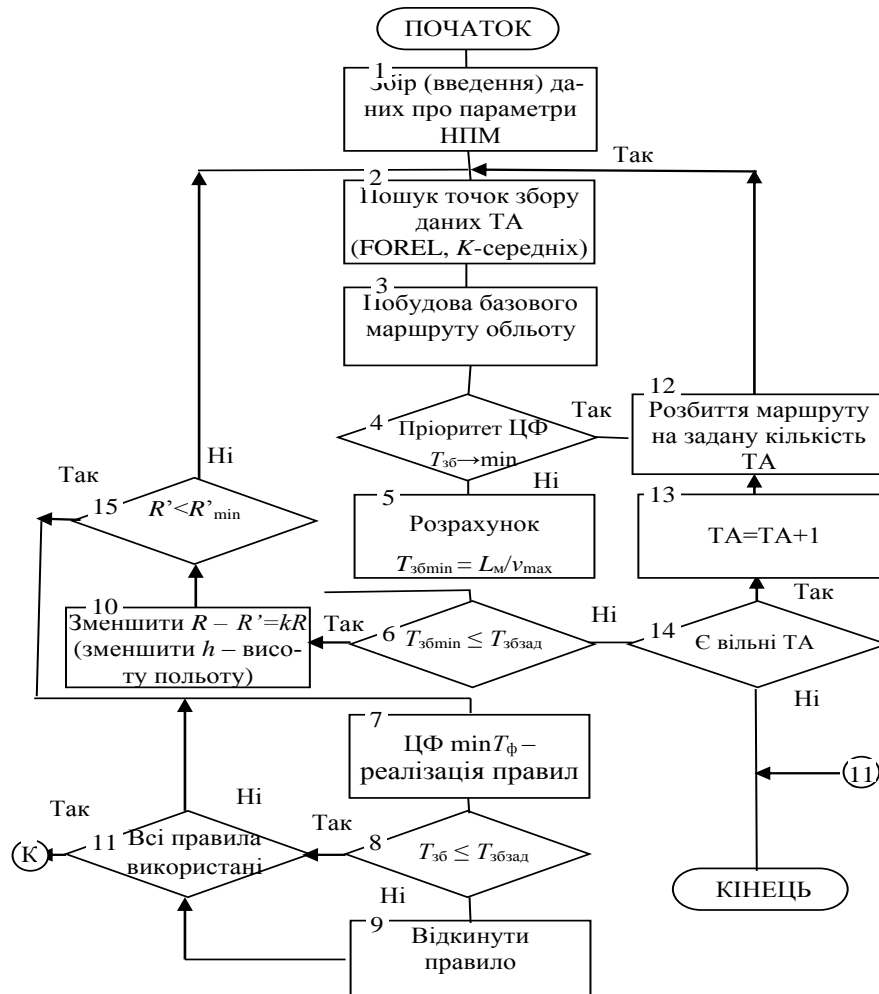


Рисунок 4 – Схема-алгоритм реалізації методу безпосереднього збору з БСМ ТА

У **третьому розділі** „Вдосконалена траєкторно-позиційна модель передачі даних між телекомунікаційною платформою та вузлами кластера” проведений аналіз існуючих МАС-протоколів, які запропоновані для БСМ, показана їх неефективність для збору даних з вузлів мережі ТА.

В роботі представлена вдосконалена траєкторно-позиційна модель передачі даних в радіоканалі між ТА і вузлами кластера, яка враховує стан вузлів (координати розташування, рівень енергії батарей, об’єм даних моніторингу) та траєкторію переміщення (положення зависання) телекомунікаційної аероплатформи, для забезпечення гарантії обслуговування вузлів. Траєкторна модель реалізована в новому гібридному (децентралізованому/централізованому) протоколі обміну даними між вузлами і ТА, який складається з 4-ох основних етапів: ініціалізація обміну ТА з сенсорними вузлами, передача вузлами кластера запитів на обмін з ТА, складання графіка передач сенсорних вузлів телекомунікаційною аероплатформою, безпосередньо обмін даними моніторингу вузлів з ТА.

1. Ініціалізація обміну. ТА періодично широкомовно передає службове повідомлення про свою присутність (ПП) (рис. 5). Вузли, які знаходяться в зоні радіозв’язності з ТА, приймають ПП та переходять в активний режим.

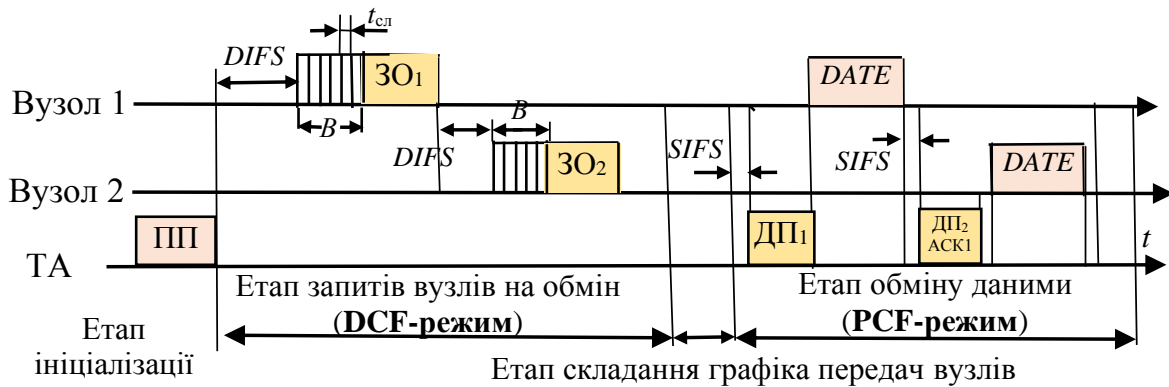


Рисунок 5 – Функціонування запропонованого гібридного протоколу

2. *Передача вузлами запитів на обмін (ЗО) до ТА (децентралізовано вузлами кластера)* з інформацією про свій стан: координати, енергія батарей та об'єм даних моніторингу. На відміну від протоколу IEEE 802.11DCF вводиться розіграш між вузлами кластера інтервалу виходу на передачу запиту ($t_{вп}$) в залежності від відстані між вузлом і траєкторією переміщення ТА (пріоритет в обслуговуванні в кластері надається вузлам, які знаходяться на найбільшій відстані від траєкторії польоту ТА).

3. *Планування ТА графіка передач вузлами кластера (централізовано ТА).*

Після обробки прийнятих запитів на обмін від вузлів кластера ТА опрацьовує графік передач вузлів в кластері (послідовність часових інтервалів $\Delta t_{пері}$ для кожного i -го вузла кластера, які пов'язані з інтервалом польоту $\Delta t_{полі} = t_{почі} - t_{кіні}$ та місцеположенням ТА на траєкторії польоту) відповідно до наступних вихідних даних відносно кожного вузла: обсяг даних моніторингу, положення вузла і ТА в кластері; відстань до вузла та рівень сигналу від нього (визначає швидкість передачі в радіоканалі та витрати енергії вузла), розміри кластера, рівень енергії батареї, час передачі, розташування вузла відносно траєкторії польоту. Пріоритет передачі вузлів в кластері ТА буде визначатися на основі ієрархії цільових функцій управління за правилами, які можуть змінити швидкість, висоту і маршрут переміщення ТА в кластері.

4. *Обмін даними (за дозволом ТА).* ТА послідовно передає повідомлення про дозвіл на передачу (ДП) даних кожному вузлу кластера і реалізує обмін.

В роботі запропоновано множину правил щодо корегування траєкторії польоту ТА для досягнення певних цільових функцій управління мережею.

Результати моделювання показали, що запропонована модель має незначну обчислювальну складність, дозволяє забезпечити збір даних зі всіх вузлів сенсорної мережі з заданою якістю, на 10 – 13% збільшує час функціонування сенсорної мережі.

Запропонована вдосконалена модель позиціонування ТА в кластері, яка визначає положення ТА у просторі в залежності від взаємного розташування вузлів та їх навантаження з врахуванням можливостей зміни швидкості передачі MAC-протоколу. Результати моделювання показали, що застосування моделі дозволяє зменшити час збору даних в кластері в середньому 12 % або знизити витрати енергії вузлів на прийомопередачу до 15%.

У **четвертому розділі** „Вдосконалений метод збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами з головних вузлів кластеризованої

безпроводової сенсорної мережі” розглянуто основні завдання управління БСМ з кластеризацією вузлами мережі: знаходження кількості та розмірності кластерів, вибір головних вузлів кластерів, побудова топології кластера, побудова та підтримка маршрутів передачі в кластері.

1. Знаходження кількості та розмірності кластерів.

Кількість і розмір кластерів впливає на час збору інформації ТА, витрати енергії батареї (час функціонування мережі), обсяг службового трафіка, затримку передачі тощо. Для рішення задачі кластеризації запропонований ітераційний алгоритм знаходження допустимого рішення – необхідної кількості кластерів в мережі, що задовольняє цільовим функціям (1) і (2). Основна його ідея – якщо збільшується $n_{кл}$, тоді збільшується $T_{зб}$ та збільшується $T_{ф}$ і навпаки. Алгоритм намагається задовольнити обмеження та отримати допустимі рішення.

Основу алгоритму складає аналітична модель витрат енергії i -го вузла e_i при різних режимах роботи (прийом, передача, моніторинг даних, сон): $e_i = e_{при} + e_{пері} + e_{моні} + e_{соні}$, яка дозволяє прогнозувати витрати енергії вузлів в одному раунді обльоту ТА і здійснювати вибір стратегій обльоту кластерів для досягнення визначених цільових функцій управління. Кількість раундів роботи (час функціонування) мережі дорівнює $NR = e_{і0}/e_i$, де $e_{і0}$ – початкова енергія i -го вузла.

Якщо $NR > NR_{зад}$, то БСМ задовольняє вимогу за часом функціонування і можна здійснювати оптимізацію за часом збору даних.

Розглянемо детальніше модель.

Кожен вузол передає дані до головного вузла кластера (ГВК) через вузли-маршрутизатори. Загальний обсяг даних обміну складають: обсяг даних моніторингу $V_{мон}$ кожного вузла переданого кожним вузлом до ГВК за побудованими маршрутами, обсяг службових даних $V_{сл}$ в кластері, визначеними прийнятими протоколами обміну на різних рівнях моделі OSI.

Енергія, що витрачається простим вузлом: здійснюється моніторинг і передача даних моніторингу ГВК через сусідній вузол j , режим сон:

$$e_{іпростий} = e_{імон} + e_{періj}V_{моні} + e_{прji}V_{прj} + e_{сон}, e_{періj} = \alpha + \beta r_{ij}^2,$$

де $e_{прji}$ и $e_{періj}$ – енергія, що витрачається на біт прийому та передачі даних, $V_{пр}$, $V_{пер}$ – об’єми даних, що передаються та приймаються; α , β – коефіцієнти, r_{ij} – відстань між вузлами i и j .

Енергія, яка витрачається вузлом-ретранслятором в маршруті від простого вузла джерела s до ГВК- q : $s-...-j-i-b-...-q$:

$$e_{іретр} = e_{іпростой} + (e_{пріj}V_{монs} + e_{періj}V_{пері} + e_{періb}V_{монs} + e_{прbi}V_{прb}) n_{уз\mathfrak{Z}},$$

де \mathfrak{Z} – множина вузлів-джерел піддерева маршруту к ГВК через i .

Енергія, яка витрачається q -м головним вузлом k -го кластера – $e_{qГВКk}$: прийом-передача з ТА; прийом даних моніторингу $V_{моні}$ від усіх вузлів кластера через j -е вузли-сусіди; передача підтвердження вузлам-сусідам; агрегування даних від всіх вузлів кластера; побудова топології $e_{топ}$; побудова маршрутів передачі $e_{марш}$; побудова кластерів $e_{класт}$; сон:

$$e_{qГВКk} = e_{прq-ТА}V_{прТА} + e_{перq-ТА}n_{вузклk}V_{моні} + e_{прqj}(n_{вузклk} - 1)V_{моні} + e_{перqj}(n_{вузклk} - 1)V_{періj} + e_{агрq}n_{вузклk}V_{моні} + e_{топ} + e_{марш} + e_{класт} + e_{мон} + e_{сон},$$

де $e_{\text{пр}q\text{-ТА}}$ та $e_{\text{пер}q\text{-ТА}}$ – енергія, яка витрачається на біт при прийомі та передачі між q -м ГВК-ТА, $e_{\text{агр}}$ – енергія, яка витрачається на агрегацію даних, $e_{\text{пр}qj}$, $e_{\text{пер}qj}$ – витрати енергії на прийом ГВК інформації від сусідніх сенсорів, $n_{\text{узклк}}$ – кількість вузлів в кластері, j – вузол-сусід вузла i .

2. Вибір головних вузлів кластерів.

На відмінність від відомих алгоритмів кластеризації (LEACH, EENC, HEED, DWENC тощо) запропонований алгоритм визначає ГВК з використанням множин метрик:

μ_1 – рівень залишкової енергії батареї вузла (пріоритет ЦФ – $\max T_{\phi}$);

μ_2 – відстань до між ГВК до ТА (пріоритет ЦФ – $\min T_{36}$);

μ_3 – кількість сусідніх вузлів у вузла;

μ_4 – відстань від вузла до головного вузла кластера;

μ_5 – кількість ретрансляцій від вузла до головного вузла кластера.

Основна ідея: на етапі планування збору даних пріоритет у виборі метрик при формуванні кластерів буде визначатися системою управління мережі на основі пріоритету цільових функцій управління ($Z_y \rightarrow \mu_y$). На рис. 6 наведений результат кластеризації БСМ при застосуванні пріоритету певних ЦФ управління (метрик).

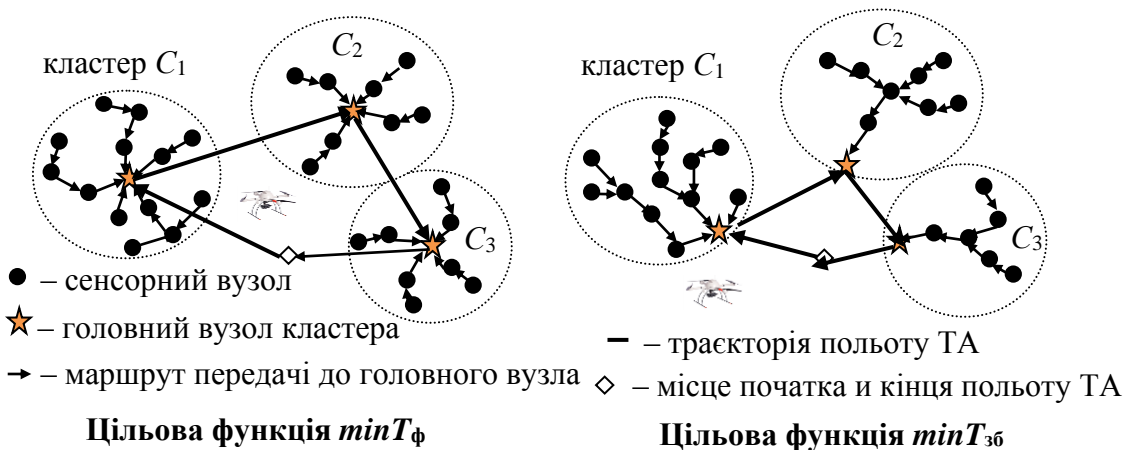


Рисунок 6 – Результат кластеризації при різних цільових функціях управління

3. Побудова топології кластера, яка відповідає цільовим функціям управління.

Запропоновано вдосконалений алгоритм управління топологією кластерів БСМ на основі правил формування RNG та Gabriel графів, які дозволяють в режимі реального часу будувати енергоефективні топології кластерів. Застосування запропонованого алгоритму дозволяє економити до 20 відсотків енергії вузлів кластерів.

4. Маршрутизація в кластері між вузлами та головним вузлом кластера.

Запропоновано застосовувати алгоритм зондової координатної маршрутизації, який будує та підтримує маршрути передачі в залежності від цільових функцій управління за рахунок використання множини метрик вибору маршрутів передачі даних від вузлів моніторингу до ГВК (енергія, яка витрачається вузлом на прийомопередачу, залишкова енергія батареї, кількість ретрансляцій, відстань до

ГВК та їх згортки). В залежності від поточної цільової функції управління мережею використовується певна множина метрик.

Розроблено узагальнений алгоритм реалізації вдосконаленого методу збору даних моніторингу з головних вузлів ТА, який реалізує сукупність алгоритмів управління: центру управління мережею, ТА, головних вузлів кластерів, вузлів-маршрутизаторів і вузлів моніторингу.

Проведено експерименти і отримані залежності: часу збору даних, часу стабільного функціонування мережі від розмірності мережі при різній кількості об'єктів ТА при застосуванні різних алгоритмів збору даних ТА з ГВК.

Показано, що вдосконалений метод збору даних моніторингу ТА з ГВК дозволяє забезпечити гарантоване обслуговування вузлів, скоротити час збору даних моніторингу в середньому на 14 %, збільшити час функціонування мережі на 10 – 15 % у порівнянні з існуючими відповідного класу методами збору даних.

У **п'ятому розділі** „Оцінка ефективності методів збору даних з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами” представлена відповідна методика оцінки, яка поєднує сукупність аналітичних моделей оцінки часу функціонування БСМ, часу збору даних моніторингу з імітаційною моделлю процесу функціонування підсистеми збору даних моніторингу системи управління БСМ.

За допомогою розроблених моделей в середовищі MATLAB проведені дослідження показників ефективності (часу збору даних, часу функціонування БСМ тощо) вдосконалених методів збору даних моніторингу в порівнянні з існуючими при різних вихідних даних: розмірність мережі N , кількість кластерів, кількість вузлів в кластері n_k тощо.

Результати моделювання вдосконаленого методу безпосереднього збору даних з вузлів БСМ ТА в порівнянні з існуючими центроїдними алгоритмами відповідного класу продемонстрували виграш у часі збору даних моніторингу мережі на 10 – 15 % (за рахунок зменшення точок збору даних) та збільшити час функціонування мережі на 12 – 17 % (рис. 7).

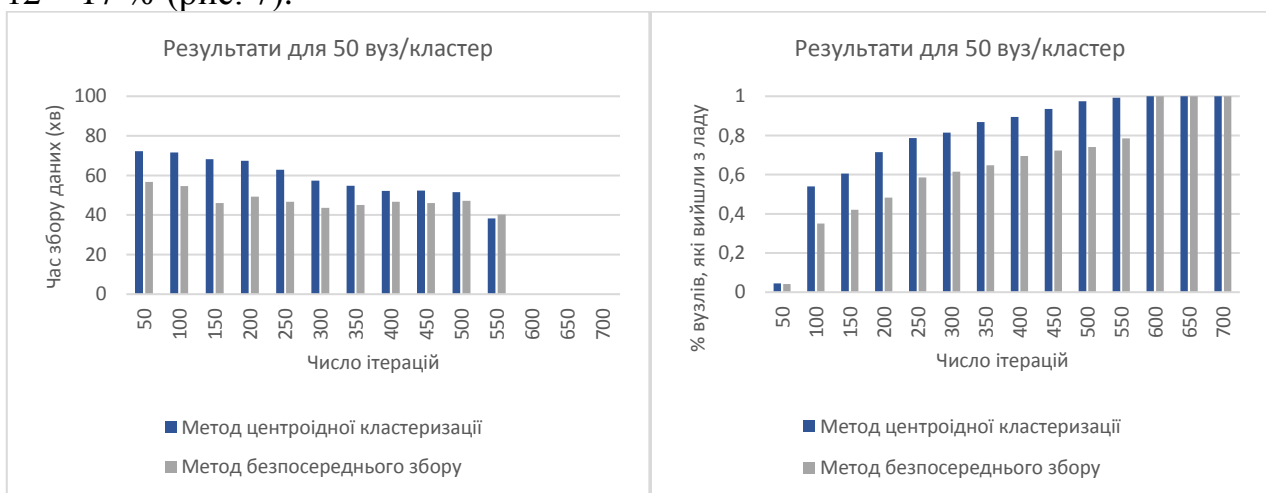
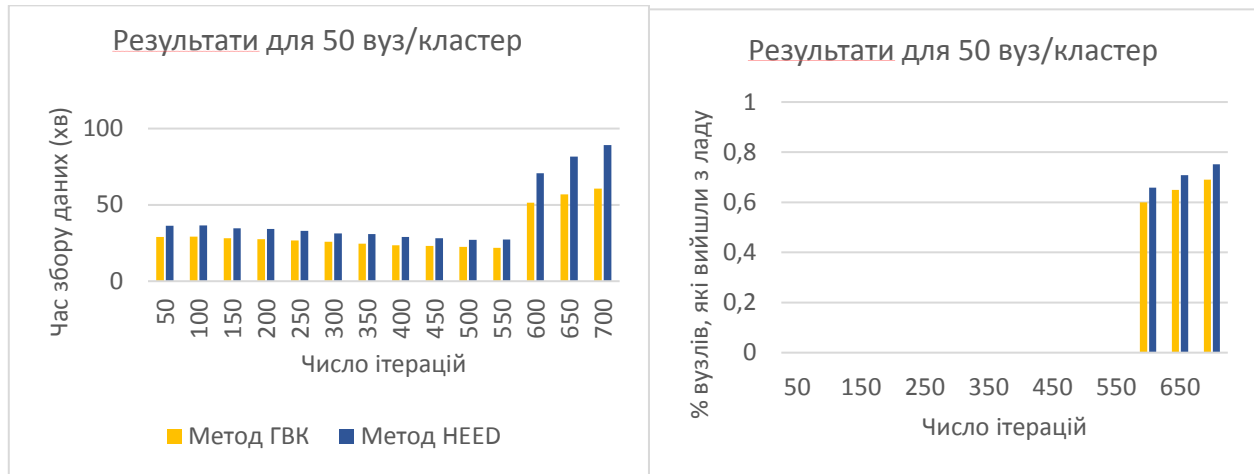


Рисунок 7 – Залежності $T_{зб}$, $T_{ф}$ при $N = 400$ та $n_k = 50$

Результати моделювання вдосконаленого методу збору даних ТА з головних вузлів кластеризованої мережі в порівнянні з відомим методом кластеризації БСМ HEED продемонстрували скорочення часу збору даних моніторингу в середньому на 14 %, збільшення час функціонування мережі на 10 – 15 %.

Рисунок 8 – Залежності $T_{зб}$, $T_{ф}$ при $N = 400$ та $n_k = 50$

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача підвищення ефективності збору даних моніторингу з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами.

Основні наукові висновки і практичні результати роботи полягають у наступному:

1. В останні роки в усьому світі все більше застосування знаходять безпроводові сенсорні мережі – розподілені, самоорганізуючі мережі, що складаються з множини вузлів, об'єднаних між собою радіоканалами, та здійснюють моніторинг параметрів зовнішнього середовища або об'єктів спостереження. Перевагами даного класу мереж є: можливість розташування в важкодоступних місцях; оперативність розгортання та обслуговування системи; надійність мережі; тривалий час роботи без втручання людини тощо.

2. Для реалізації ефективного процесу збору даних моніторингу ТА в системі управління БСМ необхідно створити відповідну підсистему, яка буде реалізовувати відповідні методи і алгоритми управління збором даних.

Запропоновані на сьогодні методи і алгоритми збору даних з БСМ ТА вирішують лише часткові завдання збору даних, не враховують особливості функціонування мереж без телекомунікаційної інфраструктури, багатокритеріальний характер цільових функцій управління мережею та потребують вдосконалення.

3. Вдосконалено метод безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів БСМ за рахунок їх кластеризації телекомунікаційними аероплатформами. Відмінність розробленого методу від відомих, що визначає його новизну, полягає в тому, що:

на етапі кластеризації мережі застосовуються два алгоритми кластерного аналізу FOREL та k -середніх для здійснення віртуальної кластеризації мережі, які, на відміну від відомих, адаптують розмір зони обслуговування телекомунікаційної аероплатформи для забезпечення цільової функції управління мережею (мінімізація часу збору даних моніторингу), та характеризуються незначною обчислювальною складністю.

на етапі обльоту кластера мережі телекомунікаційною аероплатформою запропоновані правила вибору точок обміну в кластері для зменшення витрат енергії вузлів (відповідно збільшення часу функціонування мережі).

Це дозволяє отримати в режимі реального часу близькі до оптимальних рішення та використовувати алгоритм для оперативного управління переміщенням (знаходження положення) телекомунікаційних аероплатформ.

Застосування методу дозволяє зменшити час збору даних моніторингу мережі на 10 – 15 % (за рахунок зменшення точок збору даних), та збільшити час функціонування мережі на 12 – 17 % (за рахунок реалізації нових правил обміну та обльоту вузлів в кластерах) у порівнянні з існуючими центроїдними методами безпосереднього збору даних.

Проведений аналіз чотирьох стратегій обльоту кластера (тільки центри кластерів; обліт критичних вузлів; передача в точках, ближчих до маршруту обльоту; кооперативна) показав переваги кооперованої стратегії, яка дозволяє в порівнянні з іншими до 15 % зменшити витрати енергії вузлів в кластерах.

4. Запропонована вдосконалена траєкторно-позиційна модель передачі даних між ТА і вузлами кластера, яка враховує стан та взаємне розташування вузлів відносно траєкторії переміщення (положення у просторі) телекомунікаційної аероплатформи.

Траєкторно-позиційна модель застосовує новий гібридний (децентралізований / централізований) протокол обміну даними між ТА і вузлами кластера:

децентралізований спосіб обміну – на етапі передачі вузлами запитів на обмін даними пріоритет передачі надається найбільш віддаленим вузлам від траєкторії переміщення ТА;

централізований спосіб обміну – ТА розраховує та реалізує графік передач вузлів кластера в залежності від об'єму даних моніторингу, наявної енергії батареї та відстані між ними.

Запропоновані нові правила корегування траєкторій польоту ТА при обміні даними для досягнення певних цільових функцій управління мережею.

Результати моделювання показали, що запропонована траєкторна модель має незначну обчислювальну складність, дозволяє забезпечити збір даних зі всіх вузлів кластера з заданою якістю, на 10 – 13 % збільшує час функціонування сенсорної мережі.

Позиційна модель ТА визначає положення ТА роторного типу у просторі в залежності від взаємного розташування вузлів та обсягів даних моніторингу з врахуванням можливостей зміни швидкості передачі даних протоколом каналного рівня. Результати моделювання показали, що застосування цієї моделі дозволяє зменшити час збору даних в кластері в середньому на 12 % або знизити витрати енергії вузлів на прийомопередачу до 15 %.

5. Вдосконалено метод збору даних моніторингу ТА з головних вузлів кластеризованої БСМ. Відмінність розробленого методу від відомих полягає в тому, що вперше запропоновано нові підходи до кластеризації мережі (нова множина метрик вибору головних вузлів для досягнення певних цільових функцій управління збором даних моніторингу, використання вдосконалених правил знаходження

енергоефективних топологій кластерів методом спрямованого перебору варіантів та енергозалежних метрик вибору маршрутів при застосуванні зондового координатного методу маршрутизації в кластері), що дозволяє скоротити час збору даних моніторингу в середньому на 14 %, збільшити час функціонування мережі на 10 – 15% у порівнянні з існуючими відповідного класу методами збору даних.

6. Практичне значення отриманих в дисертаційній роботі наукових результатів полягає в тому, що розроблені методи, моделі та алгоритми дозволяють підвищити ефективність спеціалізованого програмного забезпечення системи управління БСМ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях.

1. Sova O.Y. Hierarchical model of decision acceptance in intelligent manet control system / O.Y. Sova, V.A. Romanyuk, A.V. Romanyuk, O.I. Lysenko, I.V. Uryadnikova // Milan Rastislav Stefanik, Liptovskiy Mikulas. No 1, Vol. 11, 2016. P. 14 – 20. ISSN 1336-8885 (print). ISSN 2453-7632 (on-line). EBSCO. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні структури, параметрів управління в ієрархічній системі управління мережами типу manet). *Стаття входить до переліку періодичних наукових фахових виданнях держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу.*

2. Романюк А.В. Алгоритм временной кластеризации узлов беспроводных сенсорных сетей для сбора информации мониторинга с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Міжвідомчий науково-технічний збірник „Адаптивні системи автоматичного управління”, № 2 (33). – 2018. – С. 106 – 117.

3. Романюк А.В. Метод доступу до радіоканалу вузлами безпроводної сенсорної мережі при зборі даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 4. – 2018. – С. 84 – 91.

4. Романюк А.В. Задачі управління збором даних моніторингу БПЛА в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 2. – 2018. – С. 103 – 112.

5. Романюк А.В. Метод сбора информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с использованием БПЛА / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 1. – 2018. – С. 75 – 85.

6. Романюк А.В. Модели оценки эффективности функционирования беспроводных сенсорных сетей / А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ. – № 3. – 2017. – С. 125 – 134 .

7. Lysenko O. Optimal control of telecommunication airoplatform in the area of emergency / O. Lysenko, S. Valuiskyi, P. Kirchu, A. Romaniuk // Telecommunication Sciences. – 2013. – vol. 4. – № 1. – P. 14 – 20. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні правил побудови топології БСМ з використанням ТА).

8. Валуйський С.В. Вдосконалений метод підвищення пропускну здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ / С.В. Валуйський, А.В. Романюк, В.Н. Петрова // Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». –

2014. – Вип. 7. – С. 25 – 34. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні правил переміщення ТА для підвищення пропускної здатності ТА).

9. Сова О.Я. Методи обробки знань про ситуацію в мобільних радіомережах класу MANET для побудови вузлових інтелектуальних систем управління / О.Я. Сова, В.А. Романюк, Д.А. Міночкін, А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ ДУТ. – 2014. – № 1. – С. 76 – 84. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні процесу виробки рішень вузловими системами управління).

10. Лисенко О.І. Функціональна модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища / О.І. Лисенко, К.С. Козелкова, В.І. Новіков, Т.О. Прищеп, А.В. Романюк // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 10 (135). – С. 222 – 226. IndexCopernicus, GoogleScholar. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні функцій та завдань підсистем системи управління БСМ з ТА).

11. Жук О.В. Аналіз методів управління топологією в безпроводових сенсорних мережах / О.В. Жук, А.В. Романюк, Д.В. Ткаченко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 2. – С. 41 – 47. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу методів побудови енергоефективної топології БСМ).

12. Жук О.В. Моделі побудови покриття і виявлення цілей в безпроводових сенсорних мережах / О.В. Жук, А.В. Романюк, В.В. Тарасов, Д.В. Ткаченко // Збірник наукових праць ВІТІ. – 2017. – № 3. – С. 41 – 48. (Особистий внесок здобувача полягає у побудові та дослідженні математичної моделі покриття цілей в БСМ).

13. Лисенко О.І. Методика оцінки показників функціонування епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами / О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, А.В. Романюк // Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія: Техніка. – 2013. – № 6. – С. 46 – 61. (Особистий внесок здобувача полягає в аналізі показників оцінки функціонування радіомереж з самоорганізацією).

14. Стрела Т.С. Аналіз методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах / Т.С. Стрела, О.В. Жук, А.В. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ № 3. – 2017. – С. 66 – 75. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу методів побудови методів енергоефективної маршрутизації в БСМ).

15. Романюк В.А. Підходи до розробки нової архітектури системи управління неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами / В.А. Романюк, О.І. Лисенко, І.В. Алексєєва, А.В. Романюк, В.І. Новіков // Математичні машини і системи. – 2017. – № 2. – С. 15 – 23, РІНЦ. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні в визначенні задач управління БСМ, архітектури управління БСМ).

16. Romaniuk V.A. Increasing the efficiency of data gathering in clustered wireless sensors networks / V.A. Romaniuk, O.I. Lysenko, A.V. Romaniuk, O.V. Zhuk // Information and Telecommunication Sciences. – №1. – 2020. – p. 102 – 107. (Особистий внесок здобувача полягає в пропозиціях про підвищенню ефективності методів збору даних моніторингу в БСМ з застосуванням ТА).

17. Romaniuk A.V. Synthesis of data collection methods by telecommunication airplatforms in wireless sensors networks / A.V. Romaniuk, V.A. Romaniuk, O.I. Lysenko, M.K. Sparavalo, O.V. Zhuk // Information and Telecommunication Sciences. – № 2. –

2020. – р. 63 – 73. (Особистий внесок здобувача полягає у розробці складових синтезу методів збору даних моніторингу з БСМ ТА).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

18. Романюк В.А. Концепция иерархического построения интеллектуальных систем управления тактическими радиосетями класса MANET / В.А. Романюк, О.Я. Сова, П.В. Жук, А.В. Романюк // Материалы 22-й международной конференции „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо-2012). – 2012. – С. 265. Севастополь. *Scopus*. (Особистий внесок здобувача полягає у запропонуванні ідеї інтелектуалізації процесу управління мережами, що самоорганізуються).

19. Лысенко А.И. Синтез рациональной топологии сенсорной радиосети / А.И. Лысенко, С.В. Валуйский, А.В. Романюк // Материалы 23-й международной конференции (КрыМиКо-2013) „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. – 2013. – Т. 1. – С. 269 – 270. Севастополь. *Scopus*. (Особистий внесок здобувача полягає у постановці завдання та проведення моделювання).

20. Романюк А.В. Класифікація задач системи управління епізодичної радіомережі на основі телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк, С.В. Валуйський, О.І. Лисенко // Міжнародна науково-технічна конференція „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2015. Київ. – 2015. – С. 381 – 383. (Особистий внесок здобувача полягає у визначенні задач управління БСМ з використанням ТА).

21. Романюк А.В. Використання інтелектуальних систем управління в сенсорних мережах із мобільними сенсорами / А.В. Романюк, О.І. Лисенко // Міжнародна науково-технічна конференція „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2016. Київ. – 2016. – С. 465 – 467. (Особистий внесок здобувача полягає у розгляді процесу інтелектуалізації процесу управління БСМ).

22. Романюк В.А. Алгоритм принятия решений по управлению тактической беспроводной сенсорной сетью / В.А. Романюк, А.И. Лысенко, Е.А. Степаненко, А.В. Романюк, А.В. Жук // Міжнародна науково-технічна конференція „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2018. Київ. – 2018. – С. 33 – 35. (Особистий внесок здобувача полягає у розробці узагальненого алгоритму функціонування тактичною БСМ).

23. Романюк А.В. Сбор информации мониторинга в беспроводных сенсорных сетях с БПЛА / А.В. Романюк // Міжнародна науково-технічна конференція „Проблеми телекомунікацій” ПТ-2018. Київ. – 2018. – С. 402 – 405.

24. Романюк А. Методи збору даних моніторингу від вузлів безпроводних сенсорних мереж з використанням БПЛА / А. Романюк, О. Лисенко, Т. Стрела // Міжнародна науково-технічна конференція „Перспективи телекомунікацій”. Київ. – 2019. – С. 333 – 335. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу методів збору даних моніторингу з вузлів БСМ з ТА).

25. Романюк В. Способы повышения эффективности сбора данных мониторинга с использованием БПЛА при кластеризации беспроводных сенсорных сетей / В. Романюк, А. Лысенко, А. Романюк, А. Жук // Міжнародна науково-технічна конференція „Перспективи телекомунікацій”. Київ. – 2020. – С. 310 – 314. (Здобувачем визначені основні напрями та методи підвищення ефективності збору даних з вузлів БСМ при використанні ТА).

26. Lysenko O. Objective control functions of mobile ad-hoc networks using unmanned aerial vehicles / O. Lysenko, S. Danylyuk, A. Romanyuk, V. Romanyuk. // 3rd International Conference: Actual problems of unmanned aerial vehicles developments (APUAVD-2015), Київ. – 2015. P. 243 – 246. *Scopus*. (Здобувачем запропоновані цільові функції управління ТА).

27. Sova O. New strategies in using network OSI layer in manet functioning / O. Sova, V. Romanyuk, A. Romanyuk, A. Lysenko, I. Uryadnikova // *Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika Katedra bezpečnosti a obrany*. 2016, Liptovský Mikuláš, Slovakia. P. 359 – 365. (Особистий внесок здобувача полягає у проведенні аналізу способів координації різних рівнів моделі OSI мереж з самоорганізацією).

28. Sova O. Intelligent hierarchical model of the sensor and manet networks management system / O. Sova, V. Romanyuk, A. Romanyuk, A. Lysenko, I. Uryadnikova // *Usporiadateľ medzinárodnej vedeckej konferencie: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika Katedra bezpečnosti a obrany*. 2016, Liptovský Mikuláš, Slovakia. P. 349 – 358. (Здобувачем запропонована необхідність інтелектуалізації процесу управління мережами з самоорганізацією).

29. Романюк А.В. Інтелектуалізація сенсорних мереж із мобільними сенсорами / А.В. Романюк, О.І. Лисенко // Четверта міжнародна науково-практична конференція „Відкриті еволюціонуючі системи”, Ніжин. – 2017. – С. 164 – 167. (Здобувачем визначений спосіб інтелектуалізації процесу управління сенсорних мережах з мобільними вузлами).

30. Romanyuk A. The hierarchical model of intelligent control system between intelligent agents in sensor networks and manet / A. Romanyuk, O. Lysenko, V. Romanyuk, O. Sova // Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки УкрМіКо/ UkrMiCo). 2016. *Scopus*. (Здобувачем розглянута ідея побудови інтелектуальних агентів управління в гібридних мережах).

31. Samberg A. The control system of heterogeneous wireless sensor networks / A. Samberg, V. Romaniuk, A. Romaniuk, O. Lysenko, E. Stepanenko // *The International Emergency Management Society Newsletter – Special Edition. – ISSUE 5. A TIEMS Special Issue Covering, 12-13 October 2016. – P. 9 – 14*. (Здобувачем запропонована структура та функції системи управління неоднорідними БСМ).

32. Романюк А.В. Енергоефективна метрика вибору маршрутів в бездротових сенсорних мережах / А.В. Романюк // VI науково-технічна конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2012. – С. 184 – 185.

33. Романюк А.В. Вдосконалені правила перерозподілу навантаження епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк // VII науково-технічна конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2014. – С. 156 – 157.

34. Романюк А.В. Інтеграція рівнів OSI в мережі MANET з телекомунікаційними аероплатформами / А.В. Романюк // VIII науково - практична

конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2015. – С. 174 – 175.

35. Романюк А.В. Алгоритм синтезу топології епізодичної мережі радіозв’язку з використанням телекомунікаційних аероплатформ / А.В. Романюк // IX науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2016. – С. 159 – 161.

36. Романюк А.В. Моделі оцінки часу функціонування бездротових сенсорних мереж / А.В. Романюк // X наук.-прак. конф. ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спец. призначення”, 2017. – С. 210.

37. Романюк А.В. Методи збору даних моніторингу телекомунікаційними аероплатформами в безпроводових сенсорних мережах / А.В. Романюк // XI науково - практична конференція ВІТІ „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 2018. – С. 197 – 198.

38. Zhuk A. Methodology of the Tactical Wireless Sensor Networks Control / A. Zhuk, V. Romanyuk, A. Romanyuk, E. Stepanenko // In Proc. 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering. TCSET-2018. Lviv. 2018. p. 201 – 202. *Scopus*. (Здобувачем запропонований алгоритм функціонування системи управління тактичною сенсорною мережею).

39. Valuisky S. Improved Algorithm for Real Time Search of WSN Routers Placement / S. Valuisky, V. Novikov, T. Pryshchepa, A. Romaniuk // 4th International Conference Methods and systems of navigation and motion control. Kyiv, 2016. p. 72 – 75. *Scopus*. (Здобувачем запропоновані правила розміщення телекомунікаційної аероплатформи, яка виконує функції маршрутизатора).

Список праць, які додатково відображають наукові результати дисертації:

40. Романюк А.В. Цільові функції управління вузлами безпроводних сенсорних мереж для моніторингу об’єктів критичної інфраструктури / А.В. Романюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67), № 2, 2017. – С. 49 – 54.

41. Жук О.В. Використання ефекту стохастичного резонансу під час передачі інформації в безпроводних сенсорних мережах. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського / О.В. Жук, А.В. Романюк, О.В. Байдур // Серія: Технічні науки. Том 28 (67), № 1, 2017. – С. 15 – 18. (Особистий внесок здобувача полягає у пропозиції рішень щодо покращення процесу передачі між сенсорними вузлами).

42. Романюк А.В. Забезпечення стабільності пропускної здатності масштабованих ad-hoc мереж / А.В. Романюк, В.О. Давидюк // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 28 (67), № 1, 2017. – С. 35 – 40. (Особистий внесок здобувача полягає у запропонованих рішеннях щодо підвищення пропускної здатності в БСМ).

АНОТАЦІЯ

Романюк А.В. Методи збору даних з безпроводових сенсорних мереж телекомунікаційними аероплатформами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 „Телекомунікаційні системи та мережі”. – Національний

технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, 2021.

В дисертаційній роботі отримали подальший розвиток два класи методів збору даних моніторингу з безпроводових сенсорних мереж (БСМ) телекомунікаційними аероплатформами (ТА) в умовах відсутності телекомунікаційної інфраструктури загального користування. Отримані результати є вирішенням науково-прикладної задачі підвищення ефективності процесу збору даних моніторингу з БСМ ТА.

В роботі представлено вдосконалений метод безпосереднього збору даних моніторингу з вузлів безпроводової сенсорної мережі з їх кластеризацією телекомунікаційними аероплатформами. Відмінність вдосконаленого методу, що визначає його новизну, є: застосування двох алгоритмів кластерного аналізу FOREL та k -середніх для здійснення віртуальної кластеризації мережі ТА; нова траєкторно-позиційна модель обміну даними між ТА і вузлами кластера.

В роботі вдосконалено метод збору даних ТА з головних вузлів кластерів мережі за рахунок нового підходу до кластеризації мережі (запропоновані нова множина метрик вибору головних вузлів, правила знаходження енергоефективних структур кластерів та метрик побудови маршрутів в кластері).

Ключові слова: безпроводова сенсорна мережа, телекомунікаційна аероплатформа, збір даних моніторингу, кластеризація мережі.

АННОТАЦИЯ

Романюк А.В. Методы сбора данных с беспроводных сенсорных сетей телекоммуникационными аероплатформами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 „Телекоммуникационные системы и сети”. – Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев, 2021.

В диссертационной работе получили дальнейшее развитие два класса методов сбора данных с беспроводных сенсорных сетей (БСС) телекоммуникационными аероплатформами (ТА) в условиях отсутствия телекоммуникационной инфраструктуры общего пользования. Полученные результаты являются решением научно-прикладной задачи повышения эффективности сбора данных с БСС ТА.

В работе представлен усовершенствованный метод непосредственного сбора данных мониторинга с узлов БСС с их кластеризацией телекоммуникационными аероплатформами. Отличиями усовершенствованного метода, что определяет его новизну являются: применение двух алгоритмов кластерного анализа FOREL и k -средних для осуществления виртуальной кластеризации сети ТА, новая траекторно-позиционная модель обмена данными между ТА и узлами кластера.

В работе усовершенствован метод сбора данных мониторинга ТА с главных узлов кластеров за счет усовершенствованного подхода к кластеризации сети (предложены новые метрики выбора главных узлов кластера, правила нахождения энергоэффективных структур кластеров, метрики построения и поддержания маршрутов передачи в кластере).

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, телекоммуникационная аэроплатформа, сбор данных мониторинга, кластеризация сети.

SUMMARY

Romaniuk A.V. Methods of monitoring data collection by telecommunication air platforms in wireless sensor networks. – As a manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.12.02 „Telecommunication systems and networks”. – National Technical University of Ukraine „Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2021.

In recent years, wireless sensor networks (WSN) - distributed, self-organizing networks consisting of many nodes interconnected by radio channels and monitor the parameters of the environment or objects of observation - have been increasingly used around the world.

For a certain class of WSN (large size, difficult to access, placed on the territory without telecommunications infrastructure, unconnected) there are significant difficulties or impossibility of organizing the collection of monitoring data. Application in the architecture of networks of this class of telecommunication aerial platforms (TA) allows to organize and reduce the time for data collection, to connect unconnected fragments of networks, to increase the duration of network operation and the like. However, in order to implement the process of monitoring data collection in the control system of this WSN type, it is necessary to implement appropriate control methods and algorithms.

Currently proposed methods and algorithms for data collection by TA do not consider the peculiarities of functioning of this WSN class and the available network resources, the multi-criteria nature of the network management target functions, lead to a significant consumption of node energy and, accordingly, the small operating time of the network.

In dissertation work the main stages of the process of monitoring data collection by telecommunication aerial platforms from nodes in DTN (Delay Tolerant Networks) Wireless Sensors Networks are considered: network clustering (finding data collection points from TA nodes in space), construction of routes around TA collection points in the network and clusters, data exchange between cluster nodes and TA.

Two classes of monitoring data collection methods by telecommunication aerial platforms in wireless sensor networks in the absence of telecommunication infrastructure were further developed in the work: an improved direct method for collecting monitoring data from nodes of the wireless sensor network with their clustering by telecommunication aerial platforms and improved method for collecting monitoring data by TA from the main nodes of clusters.

The results obtained are a solution to the scientific and applied problem of improving the efficiency of data collection from wireless sensor network (WSN) nodes by telecommunication aerial platforms (TA).

The paper presents an improved method for direct collection of monitoring data from wireless sensor network nodes with their clustering by telecommunications aerial platforms. The feature of the improved method, which defines its novelty are:

at the TA network clustering stage, the usage of two FOREL and k-means cluster analysis algorithms to perform virtual network clustering with adaptation of TA service area size to provide target network management functions.

an improved trajectory-positioning model of data exchange and new rules for selecting exchange points to reduce the energy consumption of nodes in the cluster were proposed at the stage of flying the network cluster by a telecommunication aerial platform.

The trajectory model implements a new hybrid (decentralized / centralized) protocol of data exchange between TA and cluster nodes:

decentralized exchange method – at the stage of transferring data exchange requests by nodes, the highest priority is given to the most separated nodes from the TA movement trajectory;

centralized exchange method – TA calculates and implements the transmission schedule of the cluster nodes depending on the volume of monitoring data, available battery power and the distance between them.

New algorithms for regulating the TA polity trajectories during data exchange for achieving certain goal functions of the measure control have been proposed.

The TA position model determines the position of the TA space depending on the mutual location of nodes and the volume of monitoring data, considering the possibilities of data transmission speed change by the channel level protocol.

The method enables to gain 10 – 15 % advantage in time of data collection for network monitoring (due to reduction of data collection points), and increase time of network functioning by 12 – 17 % (due to new rules of exchange and volume of nodes in clusters) as compared to the existing centralized methods of direct data collection.

The paper improves the method of collecting TA monitoring data from the main nodes of clusters through a new approach to network clustering:

new metrics for selecting cluster master nodes are proposed, the specific choice of which is determined by the target function of network management;

rules for finding energy efficient cluster structures are defined;

the convolution of the metrics for the construction and maintenance of routes in the cluster (the energy consumption for receiving-transmitting, the battery energy of the node, the number of retransmissions, distance to the main cluster center) were proposed.

The simulation of the proposed methods of data collection by telecommunication aerial platforms for networks of different sizes, the number of nodes in the cluster was conducted. The results of the simulation demonstrated that the application of the improved collecting by TA data method from the main nodes of the clusters allows speeding up the time of collecting monitoring data by 14 % on average, increasing the time of functioning of the network by 10 – 15 % in comparison with the same class existing methods of data collection.

The practical significance of the scientific results obtained in the thesis work is that the developed methods, models and algorithms allow increasing the efficiency of the special software for the data collection control system of wireless sensor networks by telecommunication airplatforms.

Key words: wireless sensor network, telecommunication air platform, monitoring data collection, network clustering.